

자이로 구동장치를 이용한 공중 물체의 자세 제어

정영구*, 이건영
광운대학교 전기공학과

An Attitude Control of an Unstructured Object with Gyro Actuator

Young Gu Chung*, Keon Young Yi
Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon University

Abstract - In this paper, we control attitude of an unstructured object with gyro actuator.

It is well known that the attitude control of an object hanging with wire is not easy using usual actuators. Even though an actuator such as a fan can be used for control of the object, it is difficult to meet a desired control objectives. We, because of these reasons, make a gyro actuator with two motors. The first motor is responsible for spinning the wheel at high speed and the second motor is used to turn the inner gimbal.

Applying the torque to the second motor, which results in the turn of the outer gimbal, torque about the vertical axis will be obtained while the wheel of the gyro is spinning constantly. This torque is used to control the attitude of the object attached.

Gyro actuator utilize control unstructured object such as I-beam carrying by tower crane, and isolate construction workers from the dangerous environments.

We derive a relationship of wheel and its motor, find a proper capacity of wheel motor in order to rotate a wheel.

Through experiments of attitude control, we show to obtain desired control objectives.

때, 물체의 자세를 안정화시키려는 연구이다. [3]은 비행 물체가 회전하는 경우에 매달려 있는 부속물들의 자세 안정화에 관한 연구이다.

본 연구에서는 위에서 언급한 CMG를 이용한 제어대상 물체의 자세 안정화뿐만 아니라 평면상의 자세제어로 그 응용범위를 확장하고자 한다.

2. 자이로 구동장치

2.1 자이로 구동장치 구성

자이로 구동장치는 다음의 그림 1과 같다. 자이로 휠, 휠을 회전시키는 모터와 휠 및 모터를 고정하는 내부 짐벌과 내부 짐벌을 회전시키는 모터로 구성되어 있다. 그리고, 내부 짐벌을 회전시키는 모터는 외부 짐벌에 고정되어 있다. 자이로 구동장치는 마찰력이 거의 없는 회전 고리 (swivel hook)로 지지물에 매달려 있다.

부하의 회전을 측정하기 위하여 압전 진동 자이로 센서를 이용한 회전인식장치를 제작하여 자이로 구동장치에 부착할 예정이다.

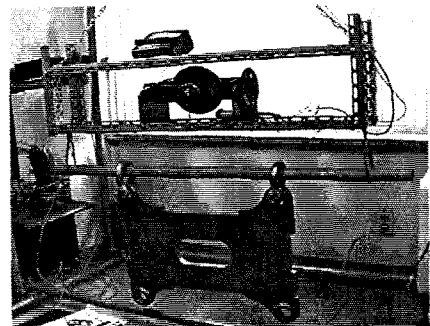


그림 1. 자이로 구동장치
Fig. 1. Gyro actuator

1. 서 론

본 논문은 CMG(control moment gyro)를 이용하여 공중 물체의 평면상의 자세를 제어하기 위한 구동장치(actuator)의 제어성능 검증에 목적을 둔다.

예를 들어, 크레인으로 빔을 이동시키는 동안 크레인 이동과 함께 빔의 자세가 임의의 방향으로 틀어지게 되는 경우나, 간판 등을 건물벽면에 부착하기 위해 벽면을 따라 이동시키는 경우에 바람등의 외력에 의해 물체의 자세가 틀어져서 대상 물체를 원하는 위치로 정확하게 위치시켜 자세를 유지하기가 매우 어렵다. 또, 위와 같은 작업은 작업대상물과 작업자의 거리가 근접한 상황에서 이루어지면 인사고가 발생할 수 있는 가능성이 존재한다.

자이로의 경우 일정 속도로 회전하는 휠(wheel)을 가지고 있고, 공간상에서 그 회전축을 현재의 상태로 유지하려는 특성을 갖는다. 또, 휠의 회전축 이외의 축에 토크(torque)가 가해지면, 토크가 가해진 축에 대한 수직축을 중심으로 회전하는 힘이 발생하게 된다(6), (9).

자이로 구동장치는 회전하는 원판이 존재하고, 외력을 가하여 짐벌(gimbal)의 자세를 조정하여 휠 회전축의 위치를 변경시켜서, 그 때 발생하는 토크를 사용하여 제어대상을 목적에 맞게 제어하는 것이다.

물체의 자세 안정화에 자이로를 사용한 예는 1994년 Kanki, Nekomoto등의 연구[1], 1997년 Ahmed, Miller등에 의해 이루어진 연구[2]와 1998년에 Li, Bainum등에 의해 이루어진 연구[3]들이 있다. 하지만, 위의 연구들에서는 비행물체나 곤도라(Gondola)등이 제어대상이었다. [1]의 경우 바람등의 외란에 의한 진동을 CMG(control moment gyro)를 이용하여 곤도라의 자세를 안정화하는 연구이고, [2]는 물체가 회전하고 있을

2.2 자이로 역학(6), (9)

그림 2에서 L_x 는 x축 방향의 각운동량, N_y 는 y축 방향의 토크, J_w 는 휠의 관성이다. 그림 2에서 x축상의 임의의 점 p에 힘을 가하면 y축을 기준으로 하는 토크, N_y 가 발생하며 그 이론적 배경은 아래와 같다.

$$\frac{dL_y}{dt} = N_y \quad (1)$$

$$L = L_x + dL_y \quad (2)$$

여기서, L 은 변화된 후의 각운동량이며, 각운동량의 변화량 dL_y 는 L_x 에 비하여 작으므로 다음의 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\phi = \frac{dL_y}{L_x} \quad (3)$$

이는 다시 (1)로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{N_y}{L_x} \quad (4)$$

위의 결과로부터 y축을 회전시키는 토크가 z축을 중심

으로한 회전운동을 일으키는 자이로 효과(gyroscopic moment effect, gyro effect)가 일어남을 알 수 있다.

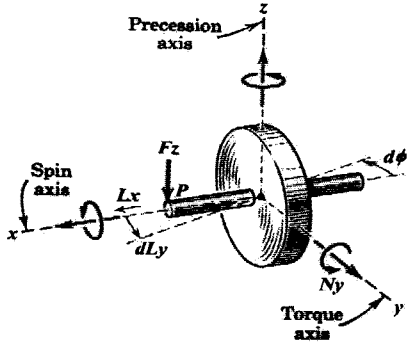


그림 2. 자이로 역학
Fig. 2. Gyro dynamics

2.3 자이로 구동장치 모델링 [4], [5]

짐벌 모터에 인가되는 전압에 대한 짐벌의 자세변화의 운동방정식은 모터의 회전자 인덕턴스를 무시하는 경우 다음과 같다.

$$G_1(s) = \frac{\theta_c(s)}{v_a(s)} = \frac{k_m}{s(\tau_m s + 1)} \quad (5)$$

$$k_m = \frac{k_t}{(k_t k_b + f_m R_a)}, \quad \tau_m = \frac{(J_r + J_c) R_a}{(k_t k_b + f_m R_a)}$$

여기서, k_t 는 토크 상수, k_b 는 역기전력 상수, τ_m 은 시정수이며, R_a 는 권선저항이다[7].

다음으로, 휠의 관성과 자이로 구동장치에 부하가 부착된 경우를 고려하여 (5)로부터 결정되는 θ_c 에 대한 부하로 전달되는 수직방향의 회전, ϕ ,을 표시하면 다음과 같다.

$$(J_r + J_c) \frac{d^2 \theta_c}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_c}{dt} = J_w \omega \frac{d\phi}{dt} - J_L \frac{d^2 \phi}{dt^2} \quad (6)$$

$$J_w = M_w \frac{r^2}{2}, \quad J_c = M_w \frac{r^2}{4} + M_w \frac{h^2}{12}, \quad J_L = M_L \frac{(a^2 + b^2)}{12}$$

여기서, J_r 은 모터 회전자의 관성, M_w 는 휠의 질량, r , h 는 각각 휠의 반경과 두께, M_L 은 부하의 질량, a , b 는 각각 부하의 가로, 세로길이이며, J_w , J_c 는 휠 자체의 회전축에 따른 관성이다[9]. 따라서, ϕ 와 θ_c 사이의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_2(s) = \frac{\phi(s)}{\theta_c(s)} = - \frac{(J_r + J_c)s + f_m}{J_L s - J_w \omega} \quad (7)$$

그러므로, 시스템 전체의 전달함수 $G(s)$ 는 다음의 (8)과 같다.

$$G(s) = -G_1(s)G_2(s) = \frac{1}{s} \frac{(J_r + J_c)k_m s + k_m f_m}{J_L \tau_m s^2 + (J_L - J_w \omega \tau_m)s - J_w \omega} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{s} \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s - a_0}$$

여기서, a_0 , b_0 , b_1 은 휠의 형상 및 회전속도, 그리고 짐벌 모터의 규격으로부터 결정되는 양의 상수이며, a_1 은 부하의 관성에 따라 양 또는 음의 상수가 된다. 즉, 위의 전달함수는 하나의 불안정한 극점을 갖는다.

2.4 휠에 따른 휠 모터의 근사적인 용량 산정

자이로 구동장치를 구현함에 있어서, 가장 먼저 결정해야 하는 것은 휠과 휠 모터의 용량이다. 그 이유는 결정되어야 하는 휠에 의해 자이로 구동장치의 전체 용량이 결정되기 때문이다.

마찰력을 무시한 모터 토크, T_m ,와 휠 토크, T_w ,사이의 관계식은 다음과 같이 근사화 할 수 있다[8].

$$J_r \frac{d\omega_c(t)}{dt} = T_m(t) - T_w(t) \quad (9)$$

위의 (9)를 기초로 휠 모터의 적정용량을 산정하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다. 먼저, t_a [sec]까지 등가속하며, 정상상태 속도는 ω_{wss} 이다.

그러면, 가속도는 ω_{wss}/t_a 와 같으며, 위의 가정을 이용하여 (9)는 다음의 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$T_m = J_r \frac{\omega_{wss}}{t_a} + T_w = J_r \frac{\omega_{wss}}{t_a} + J_w \frac{\omega_{wss}}{t_a} \quad (10)$$

$$\cong J_w \frac{\omega_{wss}}{t_a}$$

따라서, 위의 (10)을 이용하여 휠 모터의 근사적인 용량을 산정하면 다음과 같다.

$$P = T_m \omega_{wss} = J_w \frac{\omega_{wss}^2}{t_a} [kgm^2 rad^2/s^3] \quad (11)$$

$$= 9.8 J_w \frac{\omega_{wss}^2}{t_a} [W]$$

그러므로, 휠의 형상이 결정되면, 위의 (11)을 이용하여 휠 모터의 근사적인 용량을 산정할 수 있게 된다.

2.5 회전인식장치

부하의 회전을 감지하기 위하여 압전 진동 자이로 센서를 이용한 회전인식장치를 구성하였다. 본 연구에서 사용한 자이로 센서는 90[deg/s]의 각속도를 측정할 수 있는 것으로 Murata Mfg Co., Ltd에서 제작되었다.

현재 그 성능을 시험 중이며, 회전인식장치의 회로도도 다음의 그림 3과 같다.

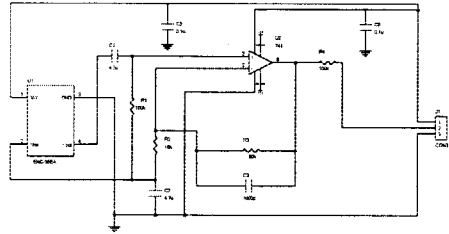


그림 3. 회전 인식 장치 회로도
Fig. 3. Circuit of rotating sensor device

3. 실험

실험실에서 제작한 소형 자이로 구동기를 이용한 자세안정화 실험은 이전의 [4], [5]에서 실행하였으며, 새로운 자이로 구동기의 자세 제어 특성을 알아보기 위해서 두 단계로 실험을 하였다. 첫 번째 단계는 짐벌의 목표각을 30°로하고 각각 다른 속도로 목표각에 도달하는 실험이고, 두 번째 단계는 짐벌의 목표각을 3개로 나누어 각각 다른 속도로 도달하는 실험이다. 실험에 사용된 주요 기기에 대한 설명과 제어기는 각각 다음의 표 1과 그림 4와 같으며, 제어기의 데이터 입출력은 C-언어를 사용하였다.

표 1. 실험에 사용된 기기 설명
Table 1. Device explain using experiments

명칭	설명
휠 모터	Tamagawa사의 60[W] 직류 모터 4000 pulse encoder
짐벌 모터	Maxon사의 15[W] 직류 모터 (18:1 gearhead, 4:1 gear로 짐벌과 연결) 2000 pulse encoder
휠 무게	161[kg]
짐벌 무게	24.55[kg]
부하 무게	53 [kg]
앵글 무게	9.3[kg]
휠 모터	Advanced Motion Control사의 12A8E
구동부	전류 구동 방식
짐벌 모터	Advanced Motion Control사의 5A5
구동부	전류 구동 방식
주제어기	386DX PC

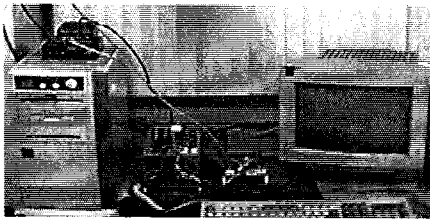


그림 4. 자이로 구동장치 제어기
Fig. 4. Controller of gyro actuator

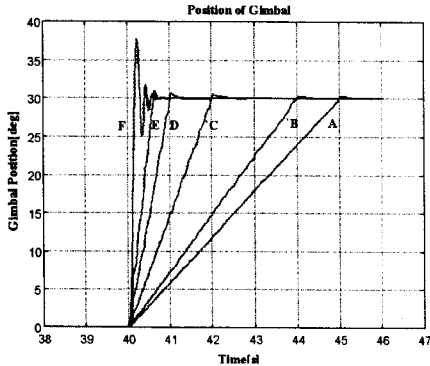


그림 5. 짐벌각의 변화
Fig. 5. Variation of gimbal angle

그림 5는 짐벌의 목표각을 30°로하고 각각 다른 속도로 목표각에 도달하는 실험에 대한 짐벌각의 궤적이며, 표 2는 각각에 대한 부하각의 변화이다. 부하각은 시간을 이용하여 측정하였으며, ±1° 정도의 오차가 발생할 수 있다.

표 2. 짐벌 속도에 따른 부하각 변화

Table 2. Variation of load angle according to gimbal velocity

	짐벌각 변화 속도	부하각 변화
A	30° / 5초	12°
B	30° / 4초	15°
C	30° / 2초	18°
D	30° / 1초	20°
E	30° / 0.6초	21°
F	30° / 0.2초	23°

위의 표 2에 의하면 짐벌각의 변화 속도가 빠를수록 부하각의 변화는 커진다. 우리는 일정한 짐벌각을 짧은 시간동안 움직이는 구동법을 임팩트 구동법(impact operation)이라 명명한다.

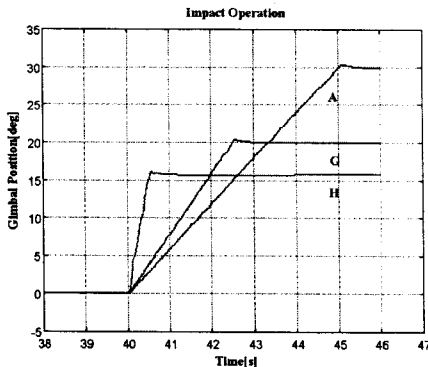


그림 6. 임팩트 구동의 예
Fig. 6. Example of impact operation

표 3. 임팩트 구동에 의한 부하각 변화

Table 3. Variation of load angle at impact operation

	짐벌각 변화 속도	부하각 변화
A	30° / 5초	11°
G	20° / 2.5초	7°
H	15.7° / 0.5초	7.5°

(4)에 의해서 알 수 있듯이 부하의 회전량은 짐벌의 각 변위에 비례한다. 그림 6에서 세 경우(A, G, H) 모두 초(sec)당 평균 짐벌 각변위(40초에서 45초까지의 면적)는 25이다. 따라서, 부하각의 변화량이 동일해야 하지만 실험에 의한 값은 다소 차이를 보인다. 그 이유는 부하의 회전에 의한 운동마찰력이나 실험 환경의 미세한 변화에 기인한 것이라 여겨진다.

본 논문에서 제안한 임팩트 구동법은 짐벌각의 변화가 제한(최대 90°)되어있는 현재의 시스템에서 동일한 부하각 변위를 얻기 위한 짐벌각의 변화량을 줄일 수 있고, 부하의 최종 가속도가 작기 때문에 운동중인 부하를 정지시키기 용이해진다. 하지만 짧은 시간동안 짐벌각을 변화시켜야하므로 짐벌 모터의 용량이 상대적으로 커져야 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 자이로 효과를 이용한 자이로 구동장치를 제작하여 부하의 자세를 제어하였다. 서론에서 언급한 것과 같이, 일반적으로 CMG는 제어 대상 물체의 자세 안정화에 사용된다. 본 논문에서는 자세 안정화뿐만 아니라 제어 대상 물체의 평면상의 자세를 제어함으로써 그 적용범위를 확장하였으며, 임팩트 구동법을 제안함으로써 효율적인 구동을 가능하게 하였다.

앞으로의 연구방향은 현재 실험 중인 회전인식장치를 자이로 구동장치에 부착하여 정확한 자세제어를 실현하며, 부하의 변화나 외란에 대해서 건설한 제어 성능을 발휘할 수 있는 제어방법과 제어기를 개발하는 것이다.

본 연구는 삼성출산 건설부문 장비연구소의 도움으로 이루어졌으며, 지면을 통해 도움주신 분들께 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Hiroshi Kanki, Yoshitsugu Nekomoto, Hiroyuki Monobe, Hironobu Ogura, Kiichi Kobayashi, "Development of CMG Active Vibration Control Device for Gondola," JSME Int. J. Series C, Vol. 37, No. 3, 1994.
- [2] Jasim Ahmed, Robert H. Miller, Edward H. Hoopman, Vincent T. Coppola, Dennis S. Bernstein, Tracie Andrusiak, David Acton, "An Actively Controlled Control Moment Gyro/GyroPendulum Testbed," Proc. 97 IEEE Int. Conf. on Control Applications, pp. 250-252, 1997.
- [3] Feiyue Li, Peter M. Bainum, N. Glenn Creamer, Shalom Fisher, "Rapid Reorientation Maneuvers of Experimental Spacecraft with a Pendulum Appendage," J. of Guidance Control & Dynamics, V. 21 N.1, pp. 164-171, 1998.
- [4] Keon Young Yi, Young Gu Chung, "An Implementation of a Gyro Actuator for the Attitude Control of an Unstructured Object," IEEE Int. Conf. Robot and Automation, Vol. 2, pp. 1626 - 1631, 1999.
- [5] 정영구, 이진영, "중성 물체의 자세 제어를 위한 자이로 액츄에이터 설계," 대한 전기학회 학회 학술대회 논문집, Vol. B, pp. 490-492, 1998.
- [6] Vernon D. Barger, Martin G. Olsson, *Classical Mechanics*, McGRAW-HILL, 1995.
- [7] Chi-Tsong Chen, *Analysis and Synthesis of Linear Control System*, Pond Woods Press, 1978.
- [8] Benjamin C. Kuo, *Automatic Control Systems*, Prentice Hall, 1995.
- [9] J. L. Merian, L. G. Kraige, *ENGINEERING MECHANICS*, WILEY, 1993.